



日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 7 月 1 4 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 2 7 4 3 0 6
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 2 7 4 3 0 6]

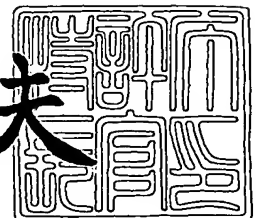
出 願 人 浜松ホトニクス株式会社
Applicant(s):



2 0 0 3 年 1 1 月 1 9 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



【書類名】 特許願
【整理番号】 2003-0223
【提出日】 平成15年 7月14日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 H01S 5/34
【発明者】
 【住所又は居所】 静岡県浜松市市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会
 社内
 【氏名】 秋草 直大
【発明者】
 【住所又は居所】 静岡県浜松市市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会
 社内
 【氏名】 枝村 忠孝
【特許出願人】
 【識別番号】 000236436
 【氏名又は名称】 浜松ホトニクス株式会社
【代理人】
 【識別番号】 100088155
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 長谷川 芳樹
【選任した代理人】
 【識別番号】 100092657
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 寺崎 史朗
【選任した代理人】
 【識別番号】 100124291
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 石田 悟
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 014708
 【納付金額】 21,000円
【提出物件の目録】
 【物件名】 特許請求の範囲 1
 【物件名】 明細書 1
 【物件名】 図面 1
 【物件名】 要約書 1

【書類名】 特許請求の範囲

【請求項 1】

G a A s からなる半導体基板と、

前記半導体基板上に設けられており、量子井戸構造におけるサブバンド間遷移によって光を生成する複数の量子井戸発光層、及び、それら複数の量子井戸発光層間夫々に設けられ前記量子井戸発光層と共にカスケード構造を形成している複数の注入層を有する活性層と

を備え、

前記活性層の前記量子井戸発光層及び前記注入層が、V族元素としてA s、P及びS bのうちの少なくとも1つと窒素とを含むIII-V族化合物半導体を含んで構成されていることを特徴とする量子カスケードレーザ。

【請求項 2】

前記III-V族化合物半導体における前記窒素の組成比が0.1%以上40%以下であることを特徴とする請求項1に記載の量子カスケードレーザ。

【請求項 3】

前記半導体基板と前記活性層との間、及び、前記活性層に対して前記半導体基板と反対側のうちの少なくとも一方に前記活性層に隣接して設けられ、V族元素としてA s、P及びS bのうちの少なくとも1つと窒素とを含むIII-V族化合物半導体から構成される半導体層を備えることを特徴とする請求項1に記載の量子カスケードレーザ。

【書類名】明細書

【発明の名称】量子カスケードレーザ

【技術分野】

【0001】

本発明は、量子井戸構造でのサブバンド間遷移を利用した量子カスケードレーザに関するものである。

【背景技術】

【0002】

近年、半導体材料を用いた赤外発光素子として、量子カスケードレーザの開発が進められている。量子カスケードレーザは、温度依存性の小さい量子井戸構造でのサブバンド間遷移を利用して光を生成するレーザ光源であり、原理的には波長 $3 \sim 70 \mu\text{m}$ 程度の波長領域の光を生成することが可能である。

【0003】

上述したように量子カスケードレーザはサブバンド間遷移を利用したPN接合を有しないユニポーラデバイスであって、周波数応答が高速であること、緩和振動が小さいこと、多重波長発振が可能であること及び温度特性に優れていることなどの特徴を備えている。

【0004】

このような量子井戸カスケードレーザとしては、半導体基板としてInP基板を用いた量子カスケードレーザ(InP-QCL)が主に知られている。また、InPよりも安価であり結晶性に優れたGaAs基板を用いた量子カスケードレーザ(GaAs-QCL)も開発されている。非特許文献1には、基板の半導体材料としてGaAsを用いた量子カスケードレーザ(GaAs-QCL)が開示されている。この非特許文献1に記載のGaAs-QCLでは、活性層をGaAs/AlGaAs層から構成し、GaAs基板と活性層との間に、GaAs基板側から順に導波路クラッド層(n^{++} 型GaAs層)及び導波路コア層(n 型GaAs層)を設けている。そして、この構成により、温度77K、波長 $9 \mu\text{m}$ でレーザ発振したことが報告されている。

【非特許文献1】C.Sirtori et. al., "Low-loss Al-free waveguides for unipolar semiconductor lasers", Appl. Phys. Lett. vol.75 (1999) pp.3911-3913.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

半導体基板としてGaAs基板を用いたGaAs-QCLの場合には、ドライエッチング等のプロセス技術を用いて超微細加工を施すことが可能であり、更なる高性能化や高機能化が期待できる。また、安価な原材料を使用できることからコスト面でも優れている。そして、パルス動作においてはInP-QCLのピーク出力を凌駕している。このようにGaAs-QCLではInP-QCLよりも優れたいくつかの特徴を有しており、GaAs-QCLの高性能化(例えば、高温での連続(CW)発振)が望まれていた。

【0006】

ところで、一般に、赤外域の波長の光を放射する半導体レーザは冷却器を必要としている。これは、可視域の波長の光を放射する半導体レーザよりも小さいエネルギーギャップ遷移を利用しているので、キャリアの熱分布に極めて敏感だからである。量子カスケードレーザにおいてもCW動作は冷却しなければならならず冷却器を必要としていた。特に素子自体の自己発熱が大きいと冷却が必要であった。

【0007】

本発明者らは、GaAs-QCLを高温でCW発振させることに関して鋭意研究を重ね、以下のことを見出した。すなわち、非特許文献1に記載のGaAs-QCLの構成では、導波路クラッド層での自由キャリア吸収を低減するために光の強度を導波路クラッド層までに十分減衰させる必要から導波路コア層の厚さを十分厚くしなければならなかった。そのため、GaAs-QCLの素子抵抗が増大され自己発熱が大きくなっていた。

【0008】

本発明は、以上の問題点を解決するためになされたものであり、素子抵抗が低減された量子カスケードレーザを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

このような目的を達成するために、本発明による量子カスケードレーザは、GaAsからなる半導体基板と、半導体基板上に設けられており、量子井戸構造におけるサブバンド間遷移によって光を生成する複数の量子井戸発光層、及び、それら複数の量子井戸発光層間夫々に設けられ量子井戸発光層と共にカスケード構造を形成している複数の注入層を有する活性層とを備え、活性層の量子井戸発光層及び注入層が、V族元素としてAs、P及びSbのうちの少なくとも1つと窒素とを含むIII-V族化合物半導体を含んで構成されていることを特徴とする。

【0010】

上記構成によれば、活性層の実効的な屈折率を、GaAsからなる半導体基板よりも大きくすることが可能である。これにより、半導体基板を導波路クラッド層として機能させ、活性層自体を導波路コア層として機能させることができる。この場合、素子の厚さを薄くすることができるので、素子抵抗を低減してその素子抵抗による素子の自己発熱を抑制できる。また、半導体基板と活性層との間の層構造を簡略化することができる。

【0011】

本発明に係る量子カスケードレーザでは、III-V族化合物半導体における窒素の組成比が0.1%以上40%以下であることが望ましい。窒素の組成比が0.1%以上であることにより、活性層への光の閉じ込めをより確実にすることが可能である。また、窒素の組成比が40%以下であることによりバンドギャップを小さくすることができる。

【0012】

更にまた、本発明に係る量子カスケードレーザでは、半導体基板と活性層との間、及び、活性層に対して半導体基板と反対側のうちの少なくとも一方に活性層に隣接して設けられ、V族元素としてAs、P及びSbのうちの少なくとも1つと窒素とを含むIII-V族化合物半導体から構成される半導体層を備えることが好適である。この場合には、上記半導体層及び活性層を全体としてコア層として機能させることができる。そして、そのコア層の実効的な屈折率を、GaAsからなる半導体基板の屈折率、或いはさらに活性層の実効的な屈折率よりも大きくすることが可能であるので、光閉じ込めを強固にすることができる。

【発明の効果】

【0013】

本発明による量子カスケードレーザでは、V族元素としてAs、P及びSbのうちの少なくとも1つと窒素とを含むIII-V族化合物半導体を活性層に用いることにより、活性層の実効的な屈折率をGaAs基板よりも高めることが可能である。そのため、GaAsからなる半導体基板をクラッド層として機能させることができるので、素子の厚さを薄くすることができる。これにより、素子抵抗が低減されて自己発熱を抑制することが可能である。また、GaAsからなる半導体基板と活性層との間の層構造を簡略化することができる。

【0014】

更に、本発明による量子カスケードレーザでは、発振波長の短波長化を実現できる。これにより、従来、中赤外に限られていた短波長限界を近赤外域まで延ばすことができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

以下、図面とともに本発明による量子カスケードレーザの好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

(第1の実施形態)

図1及び図2を参照して、本発明による量子カスケードレーザの第1の実施形態の構成

について説明する。図1は、本実施形態の量子カスケードレーザ1を示す側面断面図である。図1に示したレーザ1は、基板の半導体材料としてGaAsを用いた量子カスケードレーザである。

【0016】

レーザ1は、 $0.5 \sim 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度の低濃度ドーパのGaAs基板（半導体基板）10上に、活性層11、導波路クラッド層12、導波路クラッド層13及びコンタクト層14が順次積層されて構成されている。また、レーザ1の側面のうち、対向している所定の2面には、本レーザ1での光共振器を構成する鏡面（図示していない）が形成されている。

【0017】

活性層11は、GaAs基板10上に隣接して形成され、量子井戸構造でのサブバンド間遷移を利用して所定波長の光（例えば中赤外の波長領域内にある光）を生成する半導体層である。

【0018】

具体的には、活性層11は、量子井戸発光層（量子井戸活性層）、及び注入層が交互に積層されることにより、量子井戸発光層が多段に設けられたカスケード構造を有して形成されている。言い換えれば、活性層11は、複数の量子井戸発光層と、それら複数の量子井戸発光層の間夫々に設けられカスケード構造を形成している複数の注入層を有している量子井戸発光層及び注入層の積層数は適宜設定されるが、一組の量子井戸発光層及び注入層を積層ユニットとした場合に、積層ユニットを36層積層することが例示される。また、積層ユニットの厚さ（量子井戸発光層及び注入層の積層方向の厚さ）としては、約45.3nmが例示される。なお、積層ユニットの膜厚、及び、積層ユニットの積層数はこれに限る必要はない。

【0019】

図2は、活性層11のカスケード構造、及び量子井戸構造でのサブバンド間遷移の一例について示す模式図である。なお、図2においては、説明のため、活性層11を構成している量子井戸発光層及び注入層による積層構造のうち、2層の量子井戸発光層102、104、及び発光層102、104に挟まれた1層の注入層103の3層について、そのカスケード構造を示している。

【0020】

図2に示すように、量子井戸発光層102、104は、量子井戸層110と量子障壁層111とから構成されている。発光層102、104では、これらの量子井戸層110及び量子障壁層111により、例えば、局在化された量子準位 $n=1, 2$ から夫々サブバンドB1、サブバンドB2が形成されている。

【0021】

また、発光層102、104の間には、注入層103が設けられている。この注入層103は、量子井戸層112と量子障壁層113とから構成されており、量子井戸層112の幅が発光層102から発光層104へと向かう方向に沿って狭くなっていくように形成されている。

【0022】

このような伝導帯量子準位構造の活性層11を有するレーザ1にバイアス電圧を印加すると、電子101が発光層102のサブバンドB2に選択的に注入される。サブバンドB2に注入された電子101はサブバンドB1へと遷移し、このサブバンド間遷移により、サブバンドB1、B2のエネルギーギャップに相当する波長の光 $h\nu$ が生成される。

【0023】

また、量子井戸発光層102のサブバンドB1へと遷移した電子101は、サブバンドB1から注入層103を通過して発光層104のサブバンドB2に選択的に注入される。そして、この電子101は、量子井戸発光層104においてサブバンドB2からサブバンドB1へと遷移する。このとき、サブバンドB1、B2のエネルギーギャップに相当する波長の光 $h\nu$ が生成される。量子井戸発光層102、104においてそれぞれ生成される

光 $h\nu$ は、レーザ 1 の光共振器により共振されて、所定波長のレーザ光として出力される。さらに、上述したような量子井戸構造におけるサブバンド間遷移により光を生成する量子井戸発光層、及び注入層を多数交互に積層することにより、電子は量子井戸発光層をカスケード的に次々に移動するとともに、各発光層でのサブバンド間遷移の際に光 $h\nu$ が生成される。

【0024】

レーザ 1 においては、半導体基板として GaAs 基板 10 が用いられていることに対応して、量子井戸層は V 族元素としての As と窒素 (N) とを含む III-V 族化合物半導体である GaInNAs から構成され、量子障壁層は AlGaAs から構成されている。ここで、GaInNAs の一般式 $Ga_xIn_{1-x}N_yAs_{1-y}$ における In 及び N の組成は種々考えられるが、例えば、In の組成比 x は 0.03、N の組成比 y は 0.0044 である。このような GaInNAs を量子井戸層として量子井戸発光層及び注入層を構成することで活性層 11 の実効的な屈折率は GaAs 基板 10 よりも大きくなっている。

【0025】

図 1 を参照すると、活性層 11 からみて GaAs 基板 10 と反対側 (図中の上側) の活性層 11 上には、活性層 11 から順に導波路クラッド層 12 及び導波路クラッド層 13 が形成されている。導波路クラッド層 12 は、n 型の GaAs 層からなる半導体層であり、活性層 11 の屈折率より小さい屈折率を有する。また、導波路クラッド層 13 は、 n^{++} 型の GaAs 層からなる半導体層であり、導波路クラッド層 12 よりも更に小さい屈折率を有する。

【0026】

また、上述したように導波路クラッド層 13 上にはレーザ 1 に電流を注入する電極を接触させるためのコンタクト層 14 が形成されている。

【0027】

上記レーザ 1 における各半導体層の厚さ及びキャリア濃度の一例は表 1 のとおりである。

【0028】

【表 1】

	厚さ	キャリア濃度
導波路クラッド層 13	$1\mu\text{m}$	$n=6\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$
導波路クラッド層 12	$3.5\mu\text{m}$	$n=4\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$
GaInNAs/AlGaAs 活性層 11	$1.63\mu\text{m}$	—
GaAs 基板 10	—	$n=0.5\sim 4\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$

表 1 において、活性層 11 は、上記量子井戸層及び量子障壁層を積層した量子井戸発光層及び注入層からなる積層ユニットを 36 層積層することが例示され、この場合、例えば、積層ユニットの各層の厚さ (積層方向の厚さ)、積層順序及び各層のキャリア密度は図 3 に示す図表のとおりである。積層ユニットの構造は、図 3 の構造に限定されない。

【0029】

上述したレーザ 1 は、例えば、ガスソース MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法を用いて作製することができる。この方法では、GaAs 基板 10 上に、GaInNAs/AlGaAs 活性層 11、導波路クラッド層 12 及び導波路クラッド層 13 を順次成長させてレーザ 1 における積層構造を形成する。

【0030】

ここで、活性層 11 を構成している AlGaAs 層、及び、導波路クラッド層 12、13 である GaAs 層は従来の成長温度、すなわち 600°C 前後で成長させれば良いが、GaInNAs 層については、In の相分離を考慮に入れて 450°C 程度で成長させること

が好ましい。また、ドーパントが注入されたGaAs層である導波路クラッド層12, 13のドーパントとしては、Siが例示される。

【0031】

上記レーザ1において、活性層11の量子井戸層がGaInNAsから構成されていることが重要である。カスケード構造を形成している量子井戸発光層及び注入層が、Nを含むIII-V族化合物半導体を用いて構成されているので、上述したように活性層11の実効的な屈折率が、GaAs基板10及び導波路クラッド層12よりも高くなっている。従って、GaAs基板10、活性層11及び導波路クラッド層12により導波路構造が形成されている。言い換えれば、活性層11は、光を生成する機能と共に生成した光を導波する導波路コア層としての機能も有する。

【0032】

図4は、レーザ1の屈折率分布と、活性層11で生成された光のレーザ1における光強度分布とを示す図である。横軸は、図1においてGaAs基板10と活性層11との界面を基準にした場合の各層までの距離xを示している。縦軸は光強度及び屈折率を示している。また、実線I及び実線II夫々は光強度分布及び屈折率分布である。計算条件は次の通りである。すなわち、活性層11の量子井戸層はGa_{0.97}In_{0.03}N_{0.0044}As_{0.9956}から構成され、量子障壁層はAl_{0.33}Ga_{0.67}Asから構成されているとした。また、活性層11は、上記量子井戸層及び量子障壁層を積層した量子井戸発光層及び注入層からなる積層ユニットを36層積層したものとした。積層ユニットの各層の厚さ（積層方向の厚さ）及び積層順序は図3に示す図表のとおりである。更に、上記構成の活性層11では、波長7μmの光が発せられるとした。

【0033】

図4を参照すると、レーザ1における活性層11の屈折率は3.30であり、上述したように活性層11はGaAs基板10（屈折率：3.23）及び導波路クラッド層12よりも大きい屈折率を有している。従って、実線Iから理解されるように、活性層11での光閉じ込めが可能となっている。このときの光閉じ込め係数は0.35である。

【0034】

ここで、比較のために従来の量子カスケードレーザの構成例について説明する。図5は、従来の量子カスケードレーザを示す側面断面図である。図5に示したレーザ9は、GaAs基板を用いたGaAs/AlGaAs系の量子カスケードレーザである。

【0035】

レーザ9は、GaAs基板90上に、導波路クラッド層91、導波路コア層92、活性層93、導波路コア層94、導波路クラッド層95及びコンタクト層96が順に積層されて構成されている。

【0036】

導波路クラッド層91, 95はn⁺⁺型のGaAs層からなる半導体層であり、導波路コア層92, 94はn型のGaAs層からなる半導体層である。また、活性層93は、図1の活性層11と同様のカスケード構造を有している。ただし、活性層93では量子井戸層がGaAsから構成され、量子障壁層がAlGaAsから構成されている。

【0037】

レーザ9におけるGaAs基板90のキャリア濃度、及び、各層の厚さ及びキャリア濃度の一例は表2のとおりである。

【0038】

【表 2】

	厚さ	キャリア濃度
導波路クラッド層 9 5	1 μ m	$n=6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
導波路コア層 9 4	3.5 μ m	$n=4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
GaAs/AlGaAs 活性層 9 3	1.63 μ m	—
導波路コア層 9 2	3.5 μ m	$n=4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
導波路クラッド層 9 1	1.0 μ m	$n=6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
G a A s 基板 9 0	—	$n=3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

表 2 において、活性層 9 3 は、量子井戸層 (G a A s) 及び量子障壁層 (A l G a A s) を積層した量子井戸発光層及び注入層からなる積層ユニットを 36 層積層することが例示され、この場合、例えば、積層ユニットの各層の厚さ (積層方向の厚さ)、積層順序及び各層のキャリア密度は図 6 に示す図表のとおりである。

【0039】

レーザ 9 は、半導体基板として $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度に高濃度ドーピングされた G a A s 基板 9 0 を用いている点、活性層 9 3 の量子井戸層として G a A s を用いている点、活性層 9 3 と G a A s 基板 9 0 との間に導波路クラッド層 9 1 及び導波路コア層 9 2 を設けている点でレーザ 1 と相違する。

【0040】

図 7 は、レーザ 9 における屈折率分布と光強度分布とを示す図である。横軸は、図 5 において G a A s 基板 9 0 と導波路クラッド層 9 1 との界面を基準にした場合の各層までの距離 x を示している。縦軸は光強度及び屈折率を示している。また、実線 III 及び実線 IV 夫々は、光強度分布及び屈折率分布である。計算条件は次の通りである。すなわち、活性層 9 3 の量子井戸層は G a A s から構成され、量子障壁層は A l_{0.33}G a_{0.67}A s から構成されているとした。また、活性層 9 3 は、量子井戸層と量子障壁層とを積層した量子井戸発光層及び注入層からなる積層ユニットを更に 36 層積層して構成した。積層ユニットの各層の厚さ (積層方向の厚さ) 及び積層順序は図 6 に示す図表のとおりである。更に、上記構成において、活性層 9 3 で波長 9 μ m の光が発せられるとした。活性層 9 3 の実効的な屈折率は 3.21 であり、G a A s 導波路コア層 9 2, 9 4 の屈折率よりも小さい。そのため、活性層 9 3 に光を閉じ込めるために、高濃度ドーピングされた導波路クラッド層 9 1, 9 5 が設けられている。

【0041】

図 7 に示すように、活性層 9 3 の実効的な屈折率は導波路コア層 9 2, 9 4 の屈折率よりも小さいので、活性層 9 3 での光閉じ込めは十分にできていない。そのため、導波路クラッド層 9 1, 9 5 での自由キャリア吸収を低減するために、導波路コア層 9 2, 9 4 を十分に厚く (例えば、3.5 μ m) して、光が導波路クラッド層 9 1, 9 5 に達するまでに光強度を減衰させなければならなかった。これにより、レーザ 9 の厚さが増加するので素子の直列抵抗が増大して自己発熱が大きくなっていった。

【0042】

これに対して、本実施形態のレーザ 1 では、上述したように G a I n N A s を活性層 11 に用いていることから、G a A s 基板 10 を導波路クラッド層として用いることができる。従って、図 5 に示したレーザ 9 における導波路クラッド層 9 1 と導波路コア層 9 2 とを省くことができる。これにより、G a A s 基板 10 上の層厚が薄くなり素子抵抗が小さくなるので素子の自己発熱が低減される。そのため、安価で結晶性により優れた G a A s 基板を用いた量子カスケードレーザにおいて、電子冷却温度での CW 動作や室温での CW 動作、及び高出力化などの高性能化を図ることが可能である。更に、G a A s 基板 10 上

の層が少ないことから製造工程が簡略化され、レーザ1の製造効率を向上させることもできる構成である。

【0043】

また、通常、電子-正孔再結合に基づいたバンド間遷移レーザでは正孔に対する閉じ込めが弱まるのを回避するために、格子整合組成を避けて高歪み領域の組成が用いられている。これは、GaAsに格子整合する領域におけるGaInNAsの価電子帯レベルはGaAsのそれに近接することから価電子帯バンド不連続がほぼなくなるからである。

【0044】

これに対して、レーザ1では、伝導帯サブバンド間の遷移のみを利用しているのでGaAsと格子整合する領域のGaInNAsを用いることができる。そして、GaAsと格子整合するGaInNAsを用いることにより良質なヘテロエピタキシャル成長をさせることができるので、レーザ1はより優れた結晶性を備えることが可能となっている。

【0045】

上記レーザ1の構成の説明において、活性層11に用いられるGaInNAsにおける窒素の組成比として0.44%を例示したが、窒素の組成比は0.1%以上40%以下であれば良く、更に0.1%以上10%以下であることが好ましい。

【0046】

図8は、レーザ1において、GaInNAsにおける窒素の組成比と活性層11における光閉じ込め係数との関係を示した図である。より具体的には、Inの組成比が0.03であるGa_{0.97}In_{0.03}Asに窒素を添加した場合の活性層11の光閉じ込め係数の変化（言い換えれば、屈折率の変化）を示した図である。図8から理解されるように窒素の組成比が0.1%より小さい領域（図8の斜線部）では計算解が存在せず光閉じ込めができない。言い換えれば、GaInNAsにおける窒素の組成比が0.1%より小さい場合には、活性層11の導波モードは漏洩モードとなっておりレーザ発振が生じない。そのため、GaInNAsにおける窒素の組成比は0.1%以上であることが好適である。なお、計算に際しては、活性層11において波長7μmの光が生成されているとした。

【0047】

一方、GaInNAsなどの窒素を含むIII-N-V型混晶型半導体は窒素の電気陰性度が他の原子に比べて大きいことから混晶組成に対して巨大なバンドボウイングを持つことが知られている。GaAsに窒素を添加するとワイドギャップのGaNに近づくために通常はバンドギャップが大きくなると予想されるが、巨大なバンドボウイングにより一度GaAsのバンドギャップより減少してからGaNに向けて増加することが知られている。Bellaiicheらによると、窒素の組成比が10%程度まではバンドギャップが急激に減少し、その後は緩やかとなり、窒素の組成比が40%以上でバンドギャップは増加に転じることが示されている（Phys. Rev. B. Vol. 54, p17568 (1996)）。

【0048】

また、GaInAsはGaAsを中心として、窒素を添加することによりバンドギャップが小さくなると共に格子定数も小さくなる。一方、Inを添加するとバンドギャップが小さくなると共に格子定数は大きくなる。従って、GaAsに格子整合するGa_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}の組成はInとNとにより様々な値を取り得るが、窒素を添加してバンドギャップが小さくなるのは窒素の組成比が40%程度であることから、窒素の組成比は40%以下であることが好適である。

【0049】

ところで、非特許文献1には、77Kで波長9μmにてレーザ発振したことが示されているが、量子カスケードレーザにおいて、達成可能な最短発振波長は材料固有の伝導帯不連続(ΔE_c)に依存する。図9は、従来のGaAs基板を用いた量子カスケードレーザにおける量子井戸層Wと量子障壁層Bとの伝導帯不連続の一例を示す模式図である。図9では、量子井戸層WをGaAsから構成し、量子障壁層BをAl_{0.33}Ga_{0.67}Asから構成した場合を示している。図9に示す構成では、ΔE_cは0.264eVと見積もられ、その半分がサブバンド間遷移に使用されると仮定した場合、波長が約8μmの光hν₁が

生成される。

【0050】

これまでGaAs基板を用いた量子カスケードレーザの短波長限界は上述したような8 μm となっており、InP基板を用いた量子カスケードレーザの短波長限界は3.5 μm となっている。なお、量子カスケードレーザの短波長化は、大きな伝導帯不連続を有するナイトライド系材料(GaN/AlN)でも行われているが、良好な伝導性基板がないことに加えて設計と製造技術の両面で困難があり十分な結果は得られていない。

【0051】

これに対して、レーザ1の構成では発振波長の短波長化が可能である。図10は、量子井戸層(例えば、図2の110)をGa_{0.97}In_{0.03}N_{0.02}As_{0.98}から構成し、量子障壁層(例えば、図2の111)をAl_{0.33}Ga_{0.67}Asから構成した場合の伝導帯不連続の模式図である。この場合の伝導帯不連続(ΔE_c)は0.611eVと見積もられる。上記と同様に ΔE_c の半分がサブバンド間遷移に使用されると仮定した場合、波長が約4 μm の光 $h\nu_2$ が生成され、従来の短波長限界8 μm を凌駕することが可能となる。量子カスケードレーザは、サブバンド間遷移を利用していることから、周波数応答が高速であり、緩和振動が小さく、多重波長発振が可能であるなどの特徴を有する。そのため、上述したように発振波長の短波長化が可能となれば、通信用の光源としての応用が可能である。

【0052】

以上のように、図1に示した構成の量子カスケードレーザ1によれば、活性層11の量子井戸層が窒素を含んだGaInNAsから構成されているので、活性層11の実効的な屈折率がGaAs基板10よりも大きくなる。この場合、GaAs基板10をクラッド層として機能させることができるので、GaAs基板10上に隣接して活性層11を形成することが可能である。従って、レーザ1の半導体基板上の層厚が従来よりも薄くなり、レーザ1の素子抵抗が低減され、レーザ1の自己発熱が抑制される。これにより、レーザ1の高出力化が図られ、更に、高温での連続(CW)発振も可能となる。

(第2の実施形態)

図11は、本発明による量子カスケードレーザの第2の実施形態の構成を示す側面断面図である。図11に示したレーザ2は、図1に示したレーザ1と同様に、GaAs基板を用いた量子カスケードレーザである。

【0053】

レーザ2は、 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度に高濃度ドーピングされたGaAs基板20上に、n型のGaAs層21、GaInNAs/AlGaAs活性層11、n型のGaAs層22、導波路クラッド層13及びコンタクト層14が順に積層されて構成されている。また、第1の実施形態のレーザ1と同様に、レーザ2の側面のうち対向している所定の2面には、本レーザ2での光共振器を構成する鏡面(図示していない)が形成されている。GaAs基板20のキャリア濃度、並びに、各層の厚さ及びキャリア濃度の一例は表3の通りである。なお、活性層11の構成は第1の実施形態と同様であり、図3の図表に示す構成の積層ユニットが36層積層されたものが例示される。

【0054】

【表 3】

	厚さ	キャリア濃度
導波路クラッド層 1 3	1 μ m	$n=6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
導波路コア層 2 2	3.5 μ m	$n=4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
GaInNAs/AlGaAs 活性層 1 1	1.63 μ m	—
導波路コア層 2 1	1 μ m	$n=4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
G a A s 基板 2 0	—	$n=3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

レーザ 2 は、半導体基板として $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度に高濃度ドーピングされた G a A s 基板 2 0 を用いている点、活性層 1 1 と G a A s 基板 2 0 との間に n 型の G a A s 層 2 1 を設けている点でレーザ 1 と相違する。

【0055】

上記構成のレーザ 2 でも、G a I n N A s を量子井戸層に用いた活性層 1 1 を有しており、活性層 1 1 の実効的な屈折率は G a A s 基板 2 0 および G a A s 層 2 1, 2 2 よりも大きくなっている。そのため、図 5 のレーザ 9 のように、活性層 1 1 と G a A s 基板 2 0 との間に、導波路クラッド層 9 1 を設ける必要はなく、G a A s 層 2 1 を薄くすることができる。その結果、G a A s 基板 2 0 上の層厚を薄くすることができるので、第 1 の実施形態の場合と同様に素子抵抗を低減することができる。また、レーザ 2 において、その発振波長が G a A s 基板を用いた従来の量子カスケードレーザよりも短波長化できるのは、第 1 の実施形態の場合と同様である。

【0056】

図 1 2 は、本実施形態におけるレーザ 2 の光強度分布及び屈折率分布を示す図である。計算条件は、第 1 の実施形態の場合と同じである。横軸は、図 1 1 において G a A s 基板 2 0 と G a A s 層 2 1 との界面を基準にした場合の各層までの距離 x を示している。縦軸は、光強度及び屈折率を示している。また、実線 V 及び実線 VI 夫々は、光強度分布及び屈折率分布を示している。図 1 2 から理解されるように、G a A s 基板 2 0 と活性層 1 1 との間であって G a A s 基板 2 0 上の n 型の G a A s 層 2 1 は、活性層 1 1 を挟んで反対側の G a A s 層 2 2 と共に実質的にコア層として機能している。

【0057】

図 1 3 は、G a A s 層 2 1 の厚さと光閉じ込め係数との関係を示した図である。横軸は G a A s 層 2 1 の厚さを示し、縦軸は光閉じ込め係数を示している。図 1 3 から理解されるように、光閉じ込め係数は、G a A s 層 2 1 の厚さが 0.0 μ m ~ 2.0 μ m の範囲では単調に増加しており、厚さが 2.0 μ m を越えると減少している。そのため、G a A s 層 2 1 の厚さは 2.0 μ m 以下であることが望ましい。

【0058】

また、G a A s 層 2 1 の厚さが 1.0 μ m 近傍では光閉じ込め係数が約 0.40 で、厚さが 2.0 μ m 近傍では光閉じ込め係数が約 0.43 となっている。これから理解されるように、G a A s 層 2 1 を設け、その厚さを適宜調整することにより活性層 1 1 への光閉じ込め効果を増強することができる。

(第 3 の実施形態)

図 1 4 は、本発明による量子カスケードレーザの第 3 の実施形態の構成を示す側面断面図である。図 1 4 に示したレーザ 3 は、図 1 に示したレーザ 1 と同様に、G a A s 基板を用いた量子カスケードレーザである。

【0059】

レーザ 3 は、第 2 の実施形態のレーザ 2 において、G a A s 層 2 1 と活性層 1 1 との間、及び、活性層 1 1 と G a A s 層 2 2 との間に夫々活性層 1 1 に隣接したアンドープの G a I n N A s 層 3 1, 3 2 を設けた点でレーザ 2 と相違する。G a I n N A s 層 3 1, 3

2 の典型的な厚さは $0.3\ \mu\text{m}$ が例示される。

【0060】

上記構成では、GaAs 層 21、GaAs 層 22 の間の各層、すなわち、GaInNAs 層 31、活性層 11、GaInNAs 層 32 は全体としてコア層として機能し、GaAs 基板 20 及び導波路クラッド層 13 と共に導波路構造を形成している。

【0061】

上記 GaInNAs 層 31、32 の組成は、活性層 11 に用いられている GaInNAs と同じ組成であるが、GaInNAs 層 31、32 の屈折率は、GaInNAs/GaAs 活性層 11 の実効的な屈折率よりも大きい。従って、上述した GaAs 層 21、22 の間の各層から構成されるコア層の実効的な屈折率が大きくなる。これにより光閉じ込めをより強固にすることができる。活性層 11 と GaInNAs 層 31、32 で構成されるコア層の実効的な屈折率が GaAs 基板 20 および GaAs 層 21、22 よりも大きいことから、GaInNAs 層 31、32 の典型的な厚さ ($0.3\ \mu\text{m}$) で例示したように GaInNAs 層 31、32 は薄くても良い。そのため、GaAs 基板 20 上の全体の層厚が図 5 に示す従来のレーザ 9 よりも薄くなり、素子抵抗を低減することができている。また、上記レーザ 3 の発振波長が GaAs 基板を用いた従来の量子カスケードレーザよりも短波長化できるのは、第 1 の実施形態の場合と同様である。

【0062】

図 15 は、レーザ 3 の光強度分布と屈折率分布とを示す図である。計算条件は、第 1 の実施形態の場合と同じである。また、横軸及び縦軸は図 12 と同様である。図 15 における実線 VII 及び実線 VIII は夫々光強度分布及び屈折率分布を示している。図 15 から、上述したように GaAs 層 21、22 の間の各層から構成される層は全体としてコア層として機能していることが理解できる。

【0063】

以上本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明は上記実施形態に限定されないことは言うまでもない。例えば、活性層 11 における量子井戸層を GaInNAs から構成しているが、V 族元素として As、P、Sb のうち少なくとも 1 つと窒素とを含む III-V 族化合物半導体から構成されていれば良い。

【0064】

また、量子カスケードレーザにおける積層構造の作製方法については、ガスソース MBE 法による例を示したが、N (窒素) 源をプラズマソースとした固体ソース MBE 法、あるいは MOCVD 法などを用いて作製しても良い。

【0065】

更に、例えば図 1 に示したレーザ 1 では、活性層 11 は GaAs 基板 10 と格子整合していることが望ましいが、光学的特性が優先されるため、レーザ特性に過度の影響を与えない範囲であれば、ある程度の格子不整合は許容される。

【0066】

更にまた、第 1 の実施形態では、GaAs 基板として低濃度ドープした GaAs 基板としているが、アンドープの GaAs 基板を用いることも可能である。また、第 2 の実施形態及び第 3 の実施形態では、GaAs 基板として高濃度ドープした GaAs 基板を用いているが、低濃度ドープ GaAs 基板を用いても良い。また、第 3 の実施形態では、GaAs 基板 20 上の積層構造において活性層 11 の両外側に GaInNAs 層 31、32 を設けているが必ずしも両外側に設けている必要はなく、更に GaInNAs 層でなくても良い。例えば、活性層 11 と GaAs 基板 20 との間、及び、活性層 11 に対して GaAs 基板 20 と反対側のうちの少なくとも一方に活性層 11 と隣接して、V 族元素として As、P、及び Sb のうちの少なくとも 1 つと窒素とを含む III-V 族化合物半導体から構成される半導体層が設けられていれば良い。

【0067】

また、活性層 11 のカスケード構造の説明では、一例として 2 つのサブバンド B1、B2 が形成されているとしたが、2 つのサブバンドが形成されている場合に限らない。量子

井戸層及び量子障壁層の膜厚等を変えることにより3つ以上のサブバンドが形成されていても良い。この場合には、異なるサブバンド間遷移を利用することにより異なる波長の光を生成することも可能である。

【図面の簡単な説明】

【0068】

【図1】量子カスケードレーザの第1の実施形態の構成を示す側面断面図である。

【図2】活性層のカスケード構造、及び量子井戸構造でのサブバンド間遷移の一例について示す模式図である。

【図3】活性層11を構成する積層ユニットの各層の厚さ、各層の積層順序及びキャリア濃度の一例を示す図表である。

【図4】図1の量子カスケードレーザにおける屈折率分布と光強度分布とを示す図である。

【図5】従来の量子カスケードレーザの構成の一例を示す側面断面図である。

【図6】活性層93を構成する積層ユニットの各層の厚さ、各層の積層順序及びキャリア濃度の一例を示す図表である。

【図7】図5の量子カスケードレーザにおける屈折率分布と光強度分布とを示す図である。

【図8】活性層を構成するGaInNAsにおける窒素の組成比と光閉じこめ係数との関係を示す図である。

【図9】従来の量子カスケードレーザにおける量子井戸層と量子障壁層との伝導帯不連続の一例の模式図である。

【図10】第1の実施形態に係る量子カスケードレーザにおける量子井戸層と量子障壁層との伝導帯不連続の一例の模式図である。

【図11】量子カスケードレーザの第2の実施形態の構成を示す側面断面図である。

【図12】図11の量子カスケードレーザにおける屈折率分布と光強度分布とを示す図である。

【図13】図11の量子カスケードレーザにおけるGaAs層21の厚さと光閉じ込め係数との関係を示す図である。

【図14】量子カスケードレーザの第3の実施形態の構成を示す側面断面図である。

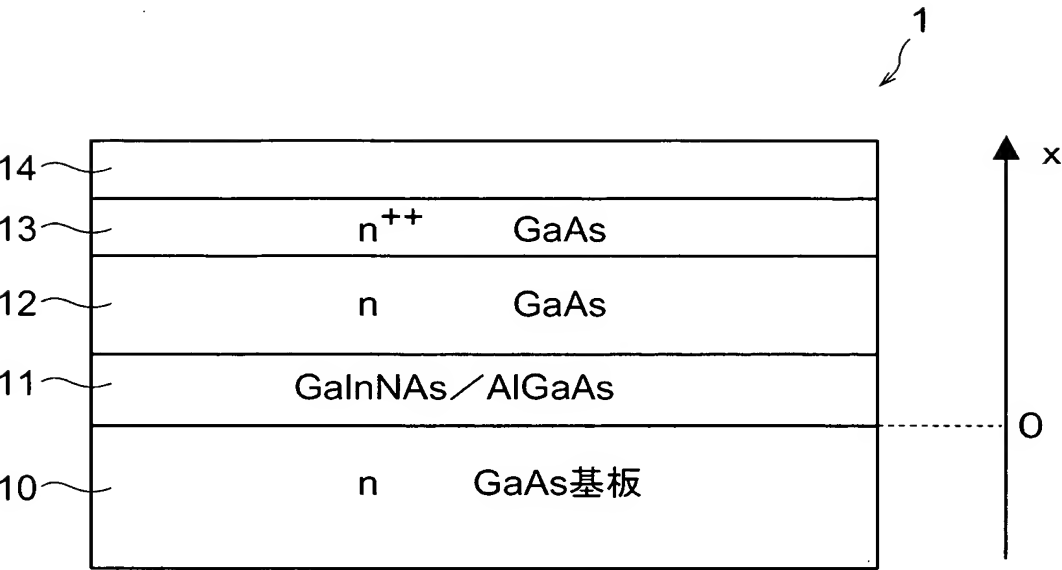
【図15】図12の量子カスケードレーザにおける屈折率分布と光強度分布とを示す図である。

【符号の説明】

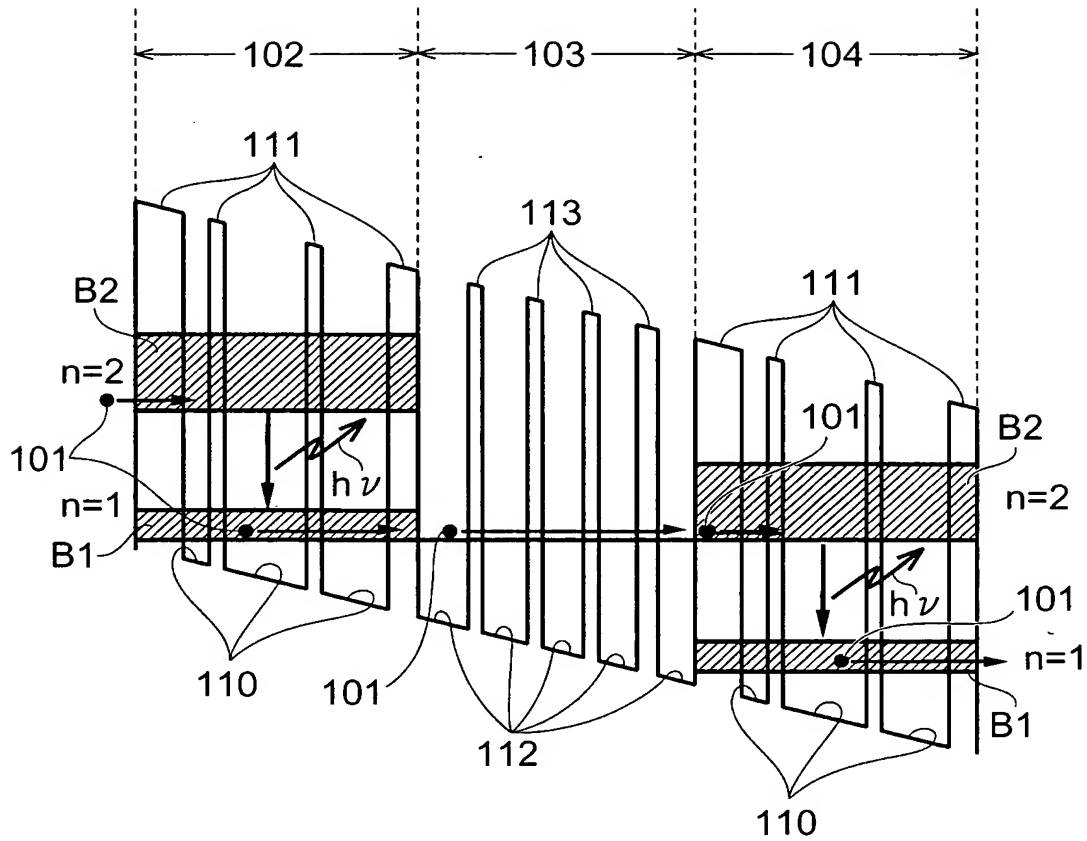
【0069】

1、2、3…量子カスケードレーザ、10…GaAs基板、11…GaInNAs/A1GaAs活性層、12、13…導波路クラッド層、14…コンタクト層、20…GaAs基板、21…GaAs層、22…GaAs層、31、32…GaInNAs層、101…電子、102…量子井戸発光層、103…注入層、104…量子井戸発光層、110…量子井戸層、111…量子障壁層、112…量子井戸層、113…量子障壁層、B1、B2…サブバンド。

【書類名】 図面
【図 1】



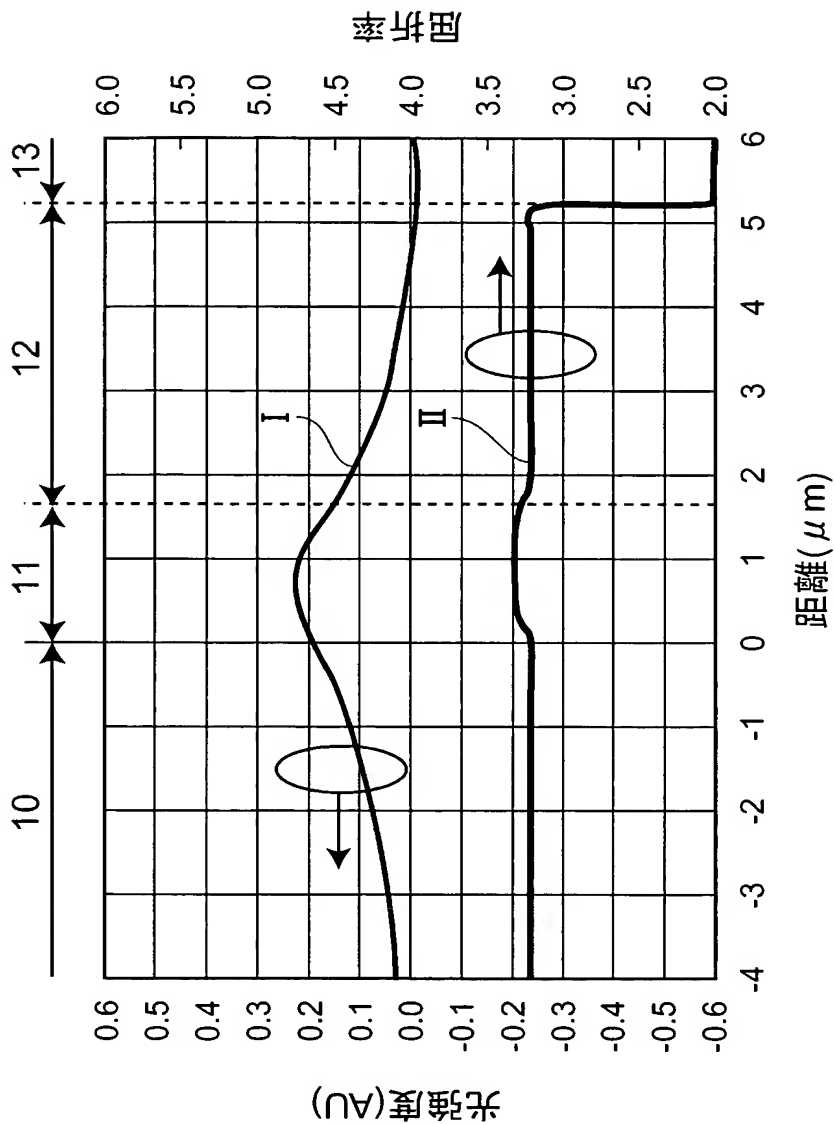
【図 2】



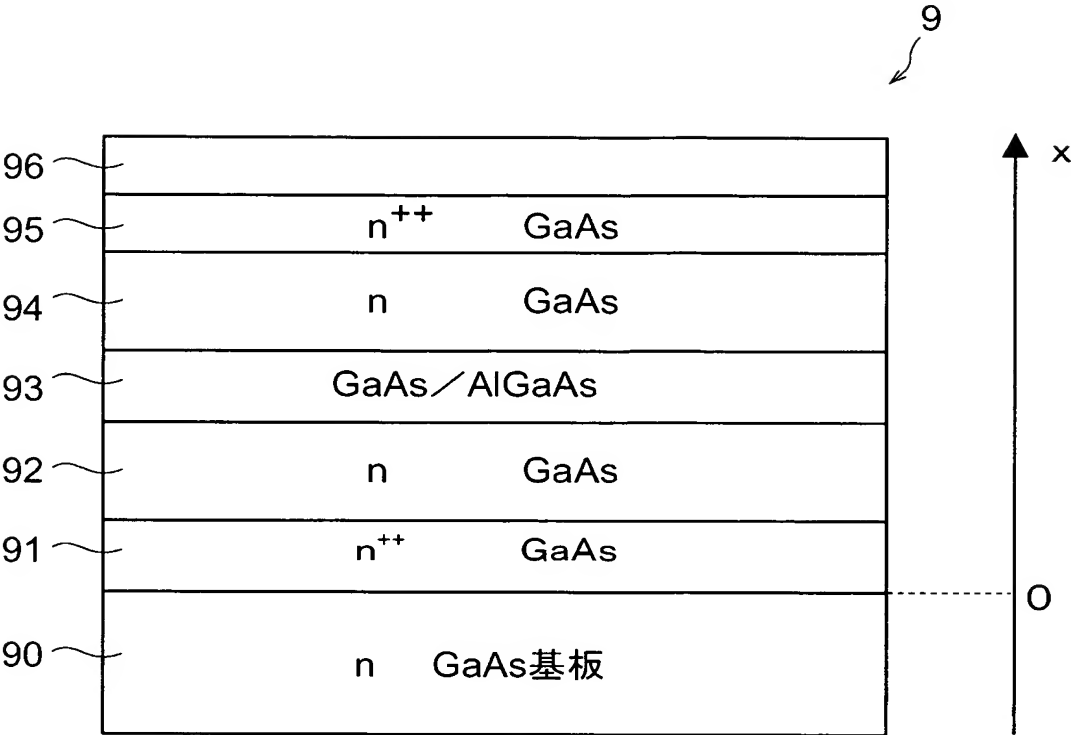
【図 3】

	層の組成	厚さ (nm)	キャリア密度 (cm^{-3})
注入層	GaInNAs	2.1	undoped
	AlGaAs	2.5	undoped
	GaInNAs	2.3	1.6×10^{17}
	AlGaAs	2.5	1.6×10^{17}
	GaInNAs	2.3	1.6×10^{17}
	AlGaAs	2.3	1.6×10^{17}
	GaInNAs	2.8	undoped
	AlGaAs	2.0	undoped
	GaInNAs	3.2	undoped
量子井戸発光層	AlGaAs	3.4	undoped
	GaInNAs	4.0	undoped
	AlGaAs	1.7	undoped
	GaInNAs	4.9	undoped
	AlGaAs	2.0	undoped
	GaInNAs	1.5	undoped
	AlGaAs	5.8	undoped

【図 4】



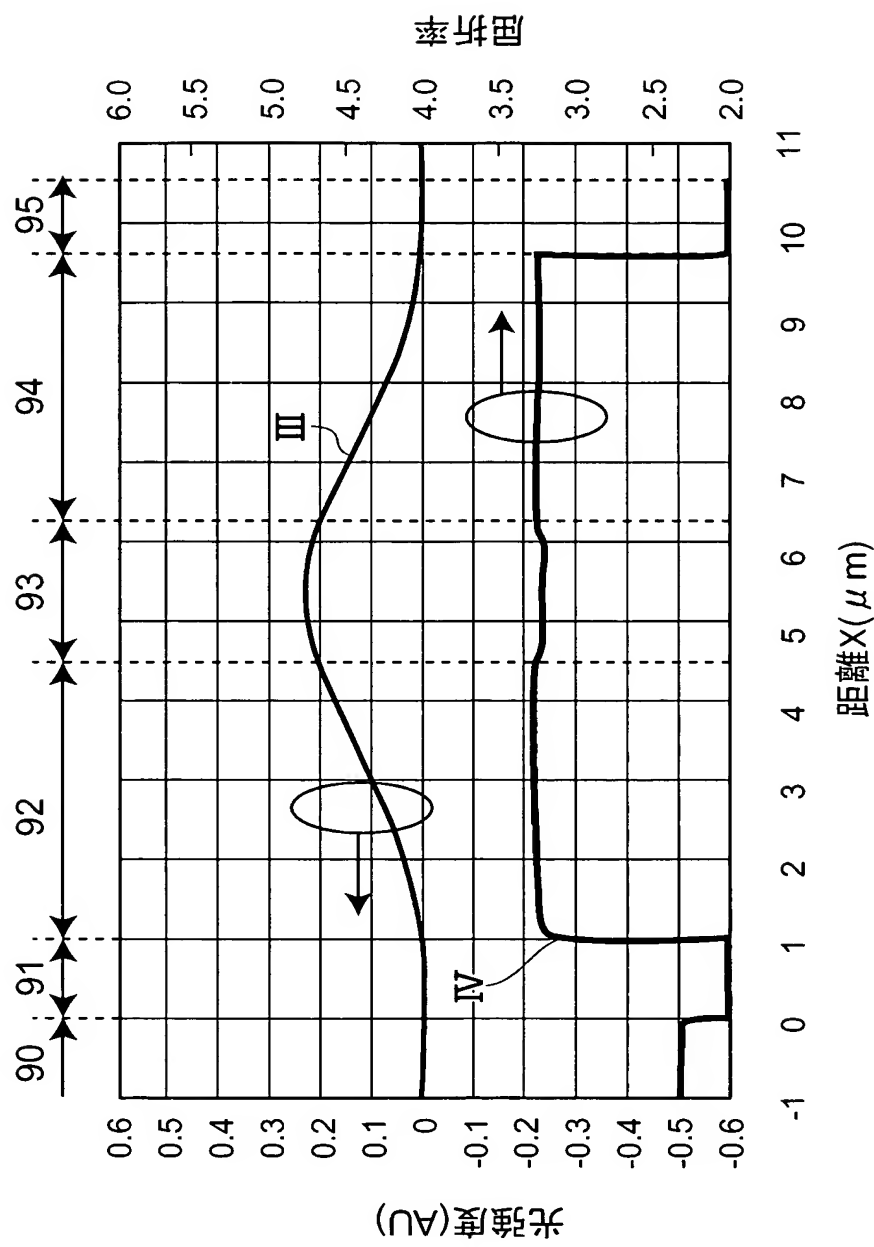
【図 5】



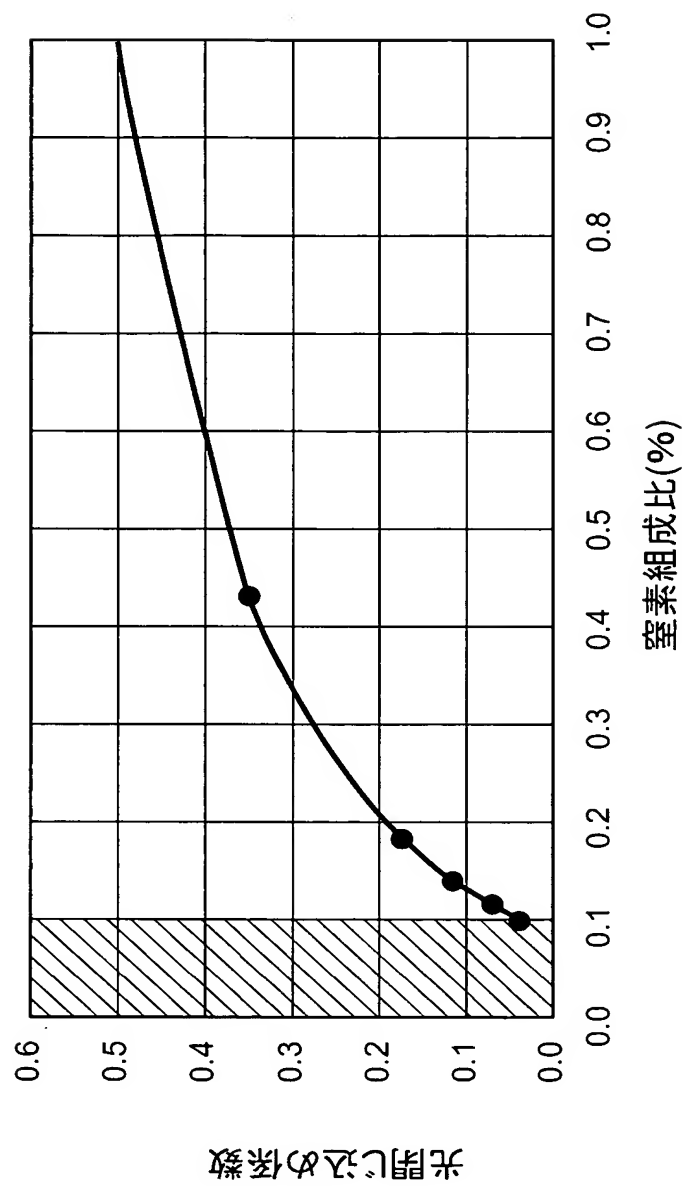
【図 6】

	層の組成	厚さ (nm)	キャリア密度 (cm^{-3})
注入層	GaAs	2.1	undoped
	AlGaAs	2.5	undoped
	GaAs	2.3	1.6×10^{17}
	AlGaAs	2.5	1.6×10^{17}
	GaAs	2.3	1.6×10^{17}
	AlGaAs	2.3	1.6×10^{17}
	GaAs	2.8	undoped
	AlGaAs	2.0	undoped
	GaAs	3.2	undoped
量子井戸発光層	AlGaAs	3.4	undoped
	GaAs	4.0	undoped
	AlGaAs	1.7	undoped
	GaAs	4.9	undoped
	AlGaAs	2.0	undoped
	GaAs	1.5	undoped
	AlGaAs	5.8	undoped

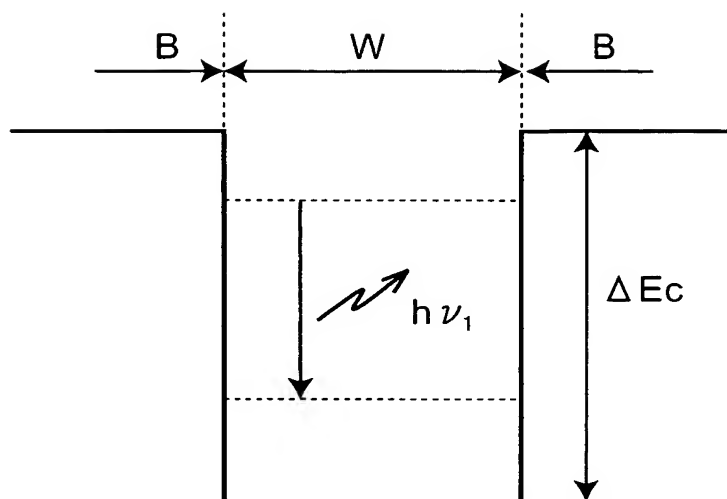
【図 7】



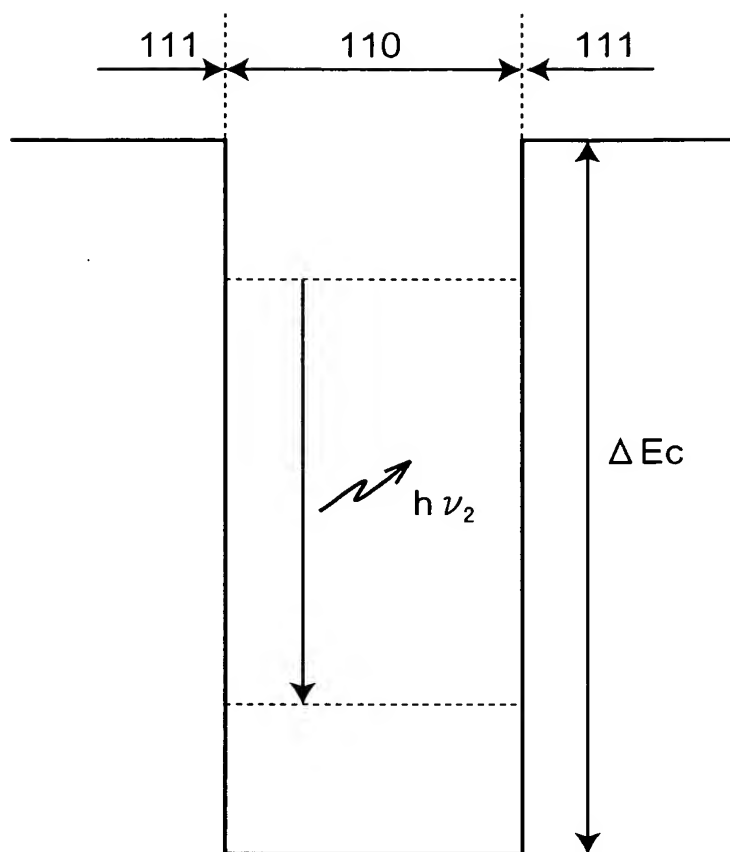
【図 8】



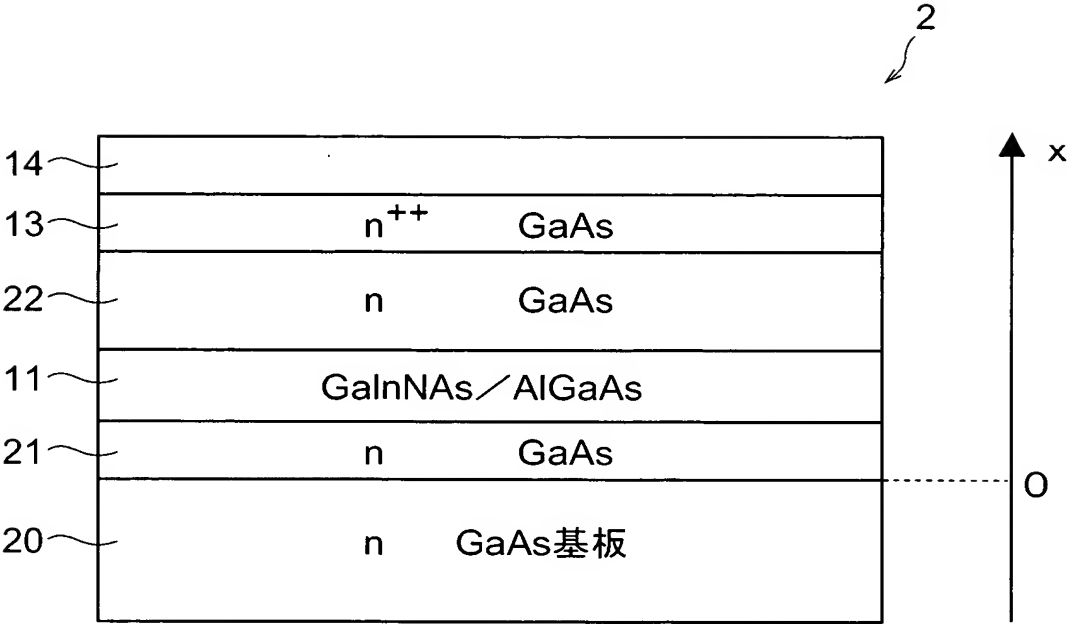
【図 9】



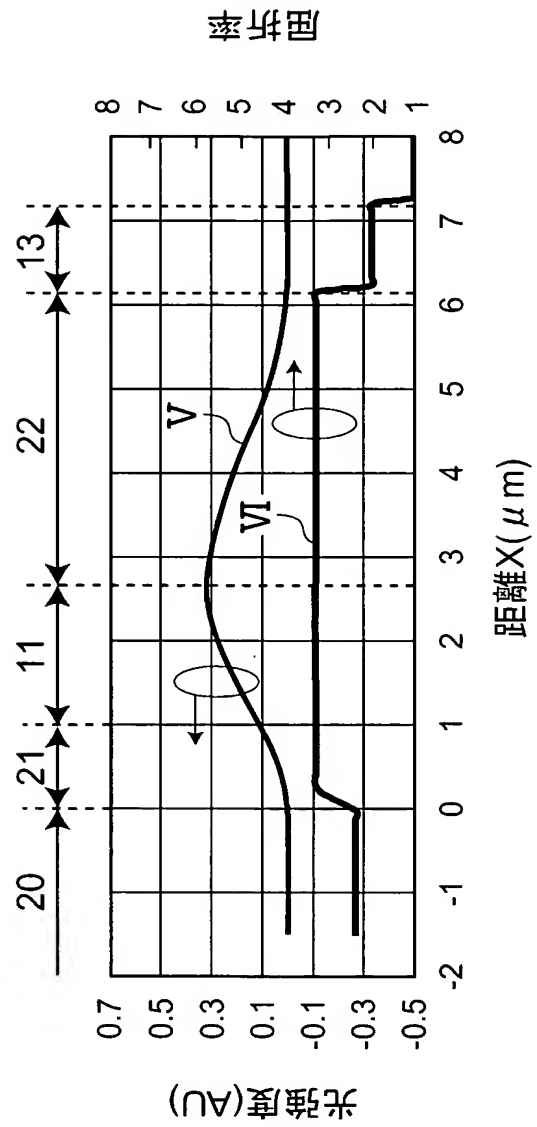
【図 10】



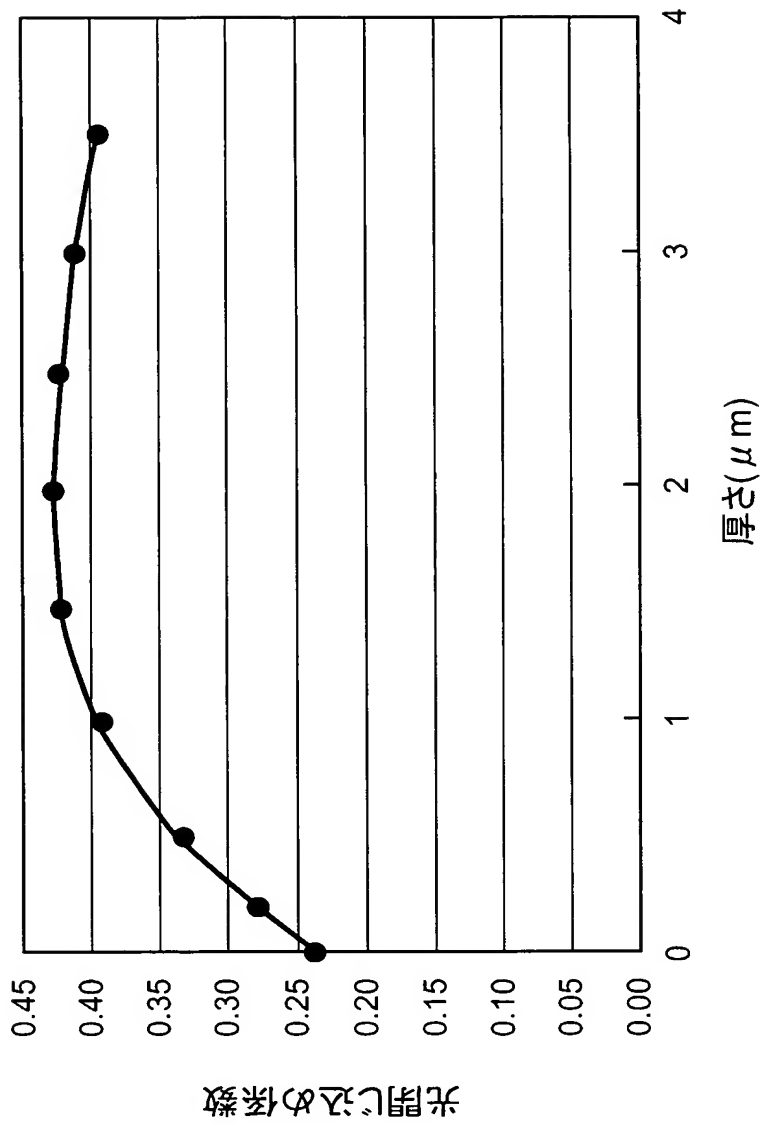
【図 1 1】



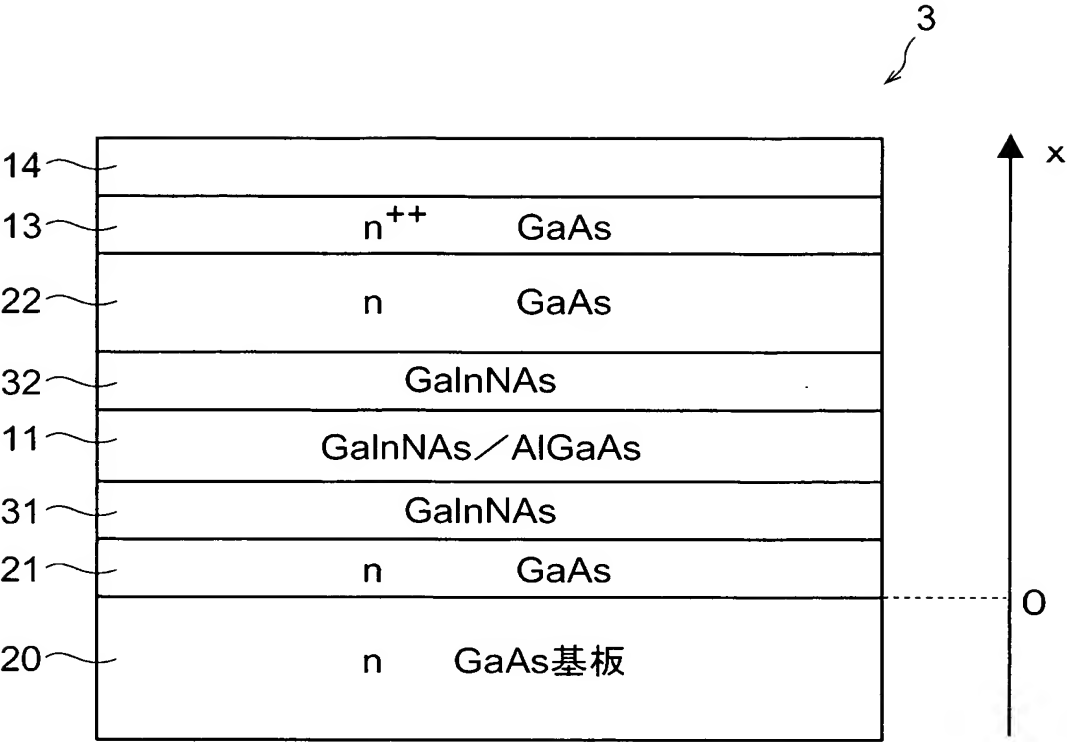
【図 12】



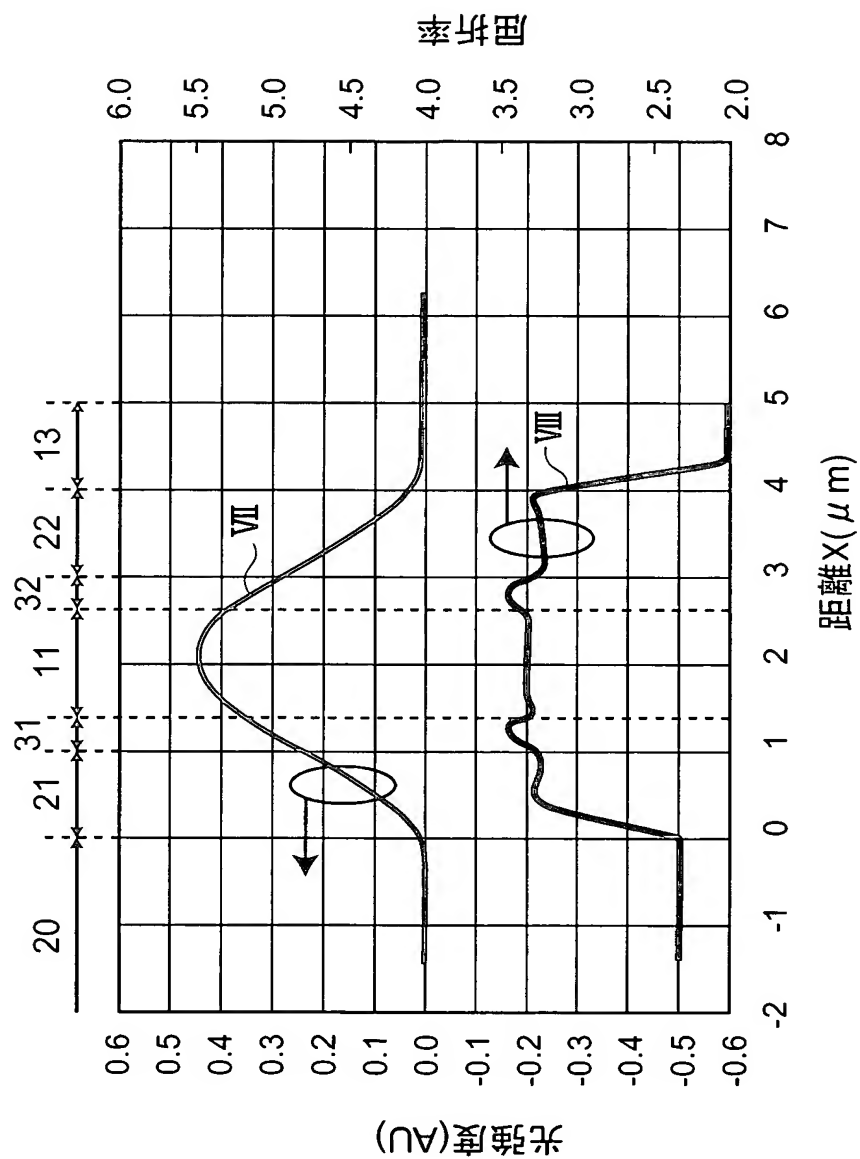
【図 1 3】



【図 1 4】



【図 15】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 素子抵抗が低減された量子カスケードレーザを提供すること。

【解決手段】 本発明に係る量子カスケードレーザは、GaAsからなる半導体基板10と、半導体基板上に設けられており、量子井戸構造におけるサブバンド間遷移によって光を生成する複数の量子井戸発光層102、104、及び、それら複数の量子井戸発光層間夫々に設けられ量子井戸発光層と共にカスケード構造を形成している複数の注入層103を有する活性層11とを備え、活性層の量子井戸発光層及び注入層が、V族元素としてAs、P及びSbのうちの少なくとも1つと窒素とを含むIII-V族化合物半導体を含んで構成されていることを特徴とする。

【選択図】 図1

特願 2 0 0 3 - 2 7 4 3 0 6

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 2 3 6 4 3 6]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 1 0 日

[変更理由]

新規登録

住 所

静岡県浜松市市野町 1 1 2 6 番地の 1

氏 名

浜松ホトニクス株式会社